
SERİ

B

CİLT

54

SAYI

1

2004

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ

ORMAN FAKÜLTESİ

DERGİSİ



F.1

ODUNUN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Prof Dr. Yener GÖKER¹⁾
Dr. Hamiyet ŞAHİN²⁾
Doç. Dr. Nurgül AY²⁾

Kısa Özet

Dielektrik bir malzeme olan odunun dielektrik özellikleri, odunun elektrik alanı ile etkileşimi sonucu, malzeme içinde meydana gelen kutuplaşma aracılığıyla elektriksel potansiyel enerjinin depolanması ve ayrıca elektrik alanı kaldırıldığında bu enerjinin bir kısmının yayılımı veya kaybı olarak ifade edilir. Odunun dielektrik özellikleri, odunun lif yönü, rutubet miktarı, yoğunluğu, alan frekansı ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu çalışmada, tam kuru ve rutubetli odunun dielektrik özellikleri üzerine bu faktörlerin etkisi hakkında bilgiler verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dielektrik özellikler, Odun, Lif yönü, Rutubet miktarı, Yoğunluk, Frekans, Sıcaklık

FACTORS AFFECTING DIELECTRIC PROPERTIES OF WOOD

Abstract

The dielectric properties of nonconductor wood material is described the interaction between the materials and the electric fields. These two interactions are the absorption and storage of electric potential energy in the form of polarization within the dielectric material, and the dissipation or loss portion of this energy when the electric field is removed. The dielectric properties of wood are affected by grain direction, moisture content, density, frequency and temperature. The effect of these factors on the dielectric properties of oven dry and moist wood are reviewed in this article.

Keywords: Dielectric properties, Wood, Grain direction, Moisture content, Density, Frequency, Temperature

1. GİRİŞ

Odun çok sayıda karmaşık ve elektriksel anlamda simetrik olmayan molekülden oluşan dielektrik bir malzemedir. Elektriksel anlamda böyle moleküller artı ve eksi yüklerin toplamı

¹⁾ İ.Ü. Orman Fakültesi Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı

²⁾ K.T.Ü. Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü

olarak adlandırılır. Elektrik alanının uygulanmasından sonra moleküllerin alanı takip etmesi için gereken süre ise relaksasyon süresi olarak tanımlanır. Odun alternatif bir elektrik alanına yerleştirildiğinde, malzeme içinde zaten varolan rasgele yönelmiş dipoller ve elektrik alanı etkisiyle oluşan dipoller elektrik alanı yönüne göre kendilerini düzene sokarlar ve bu dielektrik kutuplaşma olarak adlandırılır. Böylece elektromanyetik alan zamanla değiştiğinde (pratikte belirli bir f frekansı ile sünisoidal olarak) dipoller yeni bir denge pozisyonuna relaksa geçerler. Diğer bir deyişle, uyarılmış moleküllerin yükleri her periyot esnasında yani saniyede f defa kutup değiştirerek molekülün iki ucu arasında gidip gelirler. Enerjinin korunumundan, bu salınımların devam etmesi için elektronlar, elektromanyetik dalgalardan enerji alırlar ve bu enerji, alanın mevcudiyetinde dipoller tarafından depolanmış potansiyel enerji olarak tutulur. Alan kaldırıldığında dipoller yeni denge pozisyonuna geçerken enerji sisteme rasgele kinetik enerji olarak ısı şeklinde serbest bırakılır (TINGA 1973; VERMAAS ve ark. 1974).

Dielektrik bir malzeme olan odunun dielektrik özellikleri, odunun elektrik alanı ile etkileşimi sonucu, malzeme içinde meydana gelen kutuplaşma aracılığıyla elektriksel potansiyel enerjinin depolanması ve ayrıca elektrik alanı kaldırıldığında bu enerjinin bir kısmının yayılımı veya kaybı olarak ifade edilir. Dielektrik sabiti, odunun enerji depolama yeteneği ve kayıp faktörü odun içinde ısı şeklinde yayılan enerjinin ölçüsü olarak tanımlanır. Dielektrikteki enerji kaybı oranı ayrıca kayıp tanjantı ile de ifade edilir (PEYSKENS ve ark. 1984; TORGOVNIKOV 1993; JAMES 1975).

Odunun dielektrik davranışı odunun makroskopik (ilkbahar ve yaz odunu, özışınları ve traheler), mikroskopik (hücreler, hücrelerin ve trahelerin çeperleri, hücre çeperi tabakaları ve reçine kanalları) ve moleküler yapısına (selüloz, hemiselüloz, lignin, ekstraktif maddeler, tuzlar, su ve diğer maddelerin molekülleri) bağlıdır. Bu yüzden odunun dielektrik özelliklerinin araştırılması odunun dielektrik özellikleri ile yapısı arasındaki ilişkinin anlaşılması için önemli bir yaklaşım oluşturur (TORGOVNIKOV 1993).

2. ODUNUN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Odunun rutubet miktarı tam kuru ağırlığa oranlandığında % 0 ile 250 arasında değişir. Odun, sahip olduğu rutubet miktarına göre birkaç halde ele alınabilir. Bu hallerde odun ve rutubet arasında meydana gelen bağlar önemli farklılıklar gösterir ve bunlar rutubetli odunun dielektrik özelliklerini belirler. 103 ± 2 °C de değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş odun, tam kuru odun olarak adlandırılır ($r = \% 0$). Bu durumda odunda yalnızca hücre çeperi maddesi ve hava vardır. Hücre çeperi boşlukları su ile doymun ancak hücre lümenlerinin boş olduğu durumda odun lif doymunluk noktasındadır (LDN). LDN rutubet miktarının üzerinde odunda hücre çeperi maddesi, bağlı su ve serbest su bulunur (TORGOVNIKOV 1993; ÖRS 1986).

Odunun dielektrik özellikleri, alan frekansı, sıcaklık, lif yönü, rutubet miktarı ve özgül ağırlık gibi faktörlerden etkilenir. Ayrıca farklı ağaç türü odunları farklı dielektrik özelliklere sahiptir. Elektrik alan şiddetinin ise odunun dielektrik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirtilmektedir (TORGOVNIKOV 1993).

2.1 Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Frekansın Etkisi

Odunda elektron, iyon, dipol relaksasyon, iyon relaksasyon (ara yüzey) ve elektroliz kutuplaşma olmak üzere 5 tip kutuplaşma meydana gelir Ancak elektrik alan frekansına bağlı olarak odunun dielektrik özellikleri üzerinde her bir tür kutuplaşmanın etkisi değişir, çünkü elektrik alanı uygulandıktan sonra her bir tür kutuplaşmanın oluşma süresi farklıdır. Yani frekansa bağlı olarak bazı tip kutuplaşmanın etkisi dikkate alınmaz. Düşük frekanslarda odunda elektroliz

ve iyon relaksasyon (arayüzey) kutuplaşması meydana gelir. Bu tür kutuplaşmalar, büyük relaksasyon süresi sabiti değerleri ile karakterize edilirler. 10^4 Hz frekansın üzerinde odunun dielektrik özellikleri üzerine arayüzey kutuplaşması ve dipol relaksasyon kutuplaşmasının etkisi hakimdir. Yüksek frekans ve mikrodalga frekansla kurutmanın gerçekleştirildiği 10^5 - 10^{10} Hz frekans sınırlarında dipol ve arayüzey kutuplaşması hakim olup elektron, iyon ve elektroliz kutuplaşmanın etkisi önemsizdir (TORGOVNIKOV 1993; JAMES 1975; VERMAAS 1971).

Elektrik alanının etkisi altında bir dielektrik karışımın frekansla ilgili olarak davranışı onu oluşturan bileşenlerin dielektrik davranışından büyük ölçüde farklıdır. Bu durumda dielektrik karışımındaki relaksasyon olayı tek bir frekansta gerçekleşmez ve geniş bir dağılım söz konusudur. Bu dağılımın büyüklüğü karışımı oluşturan maddelerin kendi özel yapılarına ve miktarlarına bağlıdır.

Dielektriğin dipollerinin relaksasyon süresi aynı ise, dielektrik sabiti ve frekans arasındaki bağıntı Debye eşitliğinden bulunabilir. Eğer dielektrik farklı moleküllerden oluşuyorsa ve her bir molekül kendi özel kutuplaşma zamanına sahip ise relaksasyon zamanları dağılımı meydana gelir ve böylece en olası değer civarında dağılırlar. Polar maddelerde dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün frekans bağımlılığını belirlemek için Cole-Cole (1941) bir diyagram oluşturmuşlar ve aşağıdaki deneysel eşitliğin kullanılmasını önermişlerdir (NORIMOTO 1976; TORGOVNIKOV 1993).

$$\epsilon^* = \epsilon_{\infty}' + [\epsilon_s' - \epsilon_{\infty}'] / [1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}] \quad (1)$$

Burada; ϵ_{∞}' : sınırlı yüksek frekans bağımlı dielektrik sabiti, ϵ_s' : sınırlı düşük frekans bağımlı dielektrik sabiti, ω : açısal frekans, τ : relaksasyon süresi, α : 0 ile 1 arasında değer alan ve relaksasyon süresi dağılımını karakterize eden parametredir. $\alpha = 0$ olduğunda (1) eşitliği Debye eşitliği haline gelir.

Odunu oluşturan madde molekülleri farklı relaksasyon sürelerine sahiptirler. Bu nedenle odunun dielektrik özelliklerinin frekans bağımlılığının belirlenmesi için (1) eşitliği kullanılır.

Alan frekansı çok yüksek olduğunda, yani kutuplaşma için gerekli zaman çok kısa olduğunda alan yönü değiştiğinde moleküllerin yer değişimi tamamlanmamış olacak ya da henüz başlamış olacaktır. Bu nedenle hem yer değişim hem de güç absorpsiyonu çok küçük olacaktır ve böylece hem dielektrik sabiti hem de kayıp tanjantı küçük değere sahip olacaktır (VERMAAS ve ark. 1974).

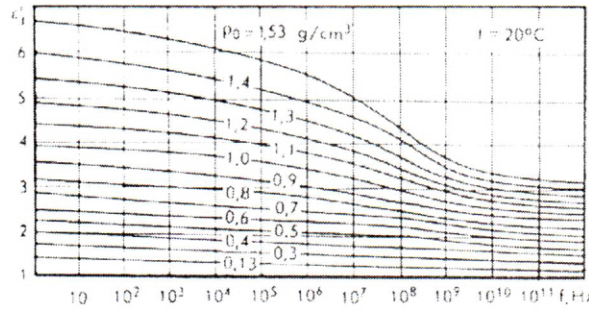
Frekans çok düşük olduğunda ise, kutuplaşma için verilen periyod nispeten çok yüksek olduğundan (moleküllerin relaksasyon süresinden yüksek olduğundan) frekansın tam değerine ulaşması için geçen süre yerdeğişim için kullanılacağından moleküllerin yerdeğişimi gerektiğinden uzun bir zaman alacaktır. Büyük bir yerdeğişim oluşacaktır ancak elektrik yerdeğişim ve elektrik alan şiddeti arasında belirgin bir fark olmayacaktır. Bu durumda dielektrik sabiti yüksek bir değer alacak, ancak önemsiz bir güç kaybı olduğundan kayıp tanjantı tekrar minimum değere sahip olacaktır. Çok düşük ve çok yüksek frekanslar arasında bir nokta vardır ki burada yerdeğişim ve elektrik alan şiddeti arasında belirgin bir fark vardır ve absorbe edilen güç maksimuma ulaşır (VERMAAS ve ark. 1974).

Düşük frekanslarda yapılan bazı çalışmalara göre (JAMES 1975; JAMES 1977; KABIR ve ark. 1998), frekans ne kadar düşük ise dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün de o kadar yüksek olacağı belirtilmektedir. Düşük frekanslarda (10 kHz' in altındaki) elektrik kutuplaşma ara yüzey kutuplaşmasıdır ve selülozun amorf ve kristal bölgelerinden kaynaklanan süreksizlikle açıklanır. Kristal bölgeler nonhigroskopiktir ve suyun bulunması durumunda iletken değilken, amorf

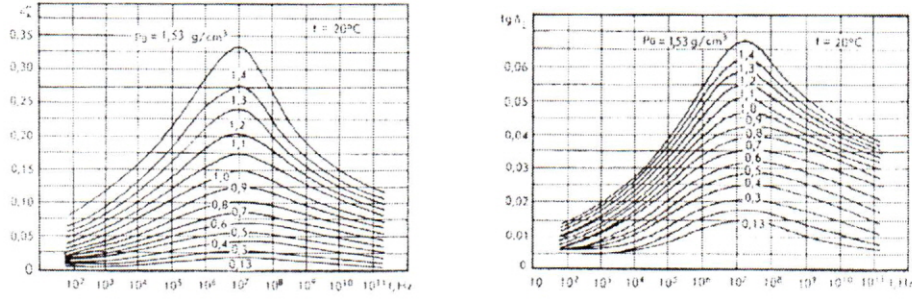
bölgeler rutubet miktarı artarken süratle çok iletken olurlar. Frekans artarken dielektrik sabiti homojen polar maddelerin tipik bir değerine azalır ve ara yüzey kutuplaşmasının katılımı önemsiz hale gelir ve moleküler (dipol) kutuplaşma baskın rol oynar. Dipol kutuplaşmasının baskın rol oynadığı frekans sınırlarında frekansın artışıyla kutuplaşabilen dipollerin sayısında monoton bir azalma olur (JAMES/HAMILL 1965). Bu durum mikrodalga frekanslara kadar sürer (10 GHz). Bu durumda enerji, molekülde meydana gelen dipol momenti şeklinde ve sabit dipol momentine sahip moleküllerin elektrik alanına göre yer değiştirmeleri şeklinde absorbe edilir. Bu yüksek frekanslarda suyun rolü selüloz moleküllerine higroskopik olarak bağlı polar gruplarının ilavesiyle basit şekilde selüloz moleküllerinin kutuplaşabilirliğini artırmaktır. Bu şekilde sabit dipol momenti artar ve elektrik alanının etkisi altında sapanmış moleküller tarafından absorbe edilen enerji artar (JAMES 1975; JAMES 1977; KABIR ve ark. 1997).

Mikrodalga frekanslarda bir maddenin molekülleri ile elektromanyetik alan arasındaki etkileşim karakteri düşük frekanslardakinden daha farklıdır. Çünkü mikrodalga frekanslarda elektrik alan titreşim periyodu moleküllerin relaksasyon süresinden daha yüksektir. Bu yüzden alan şiddeti vektörü ile yer değişim vektörü arasında bir faz farkı meydana gelir. Bu frekansın artışıyla birlikte dielektrik sabitinde azalmaya neden olurken, kayıp tanjantı değerinde artışa neden olur. Bu özellik, yani dielektrik sabitinde azalış ve kayıp faktöründeki artış çeşitli çalışmalarda farklı odun türleri için belirlenmiştir (KABIR ve ark. 1997; KABIR ve ark. 1998).

Tam kuru odun elektromanyetik alan içinde tipik bir polar dielektrik gibi davranır. Frekansın artışıyla birlikte dielektrik sabiti monoton bir şekilde azalır. Çünkü polar moleküllerin daha az bir kısmı elektrik alan değişimlerini takip etmek için yeterli zamana sahiptir. Şekil 1-2'de çeşitli özgül ağırlıktaki tam kuru odunun dielektrik parametrelerinin frekansla değişiminin genel karakteri verilmektedir (TORGOVNIKOV 1993).

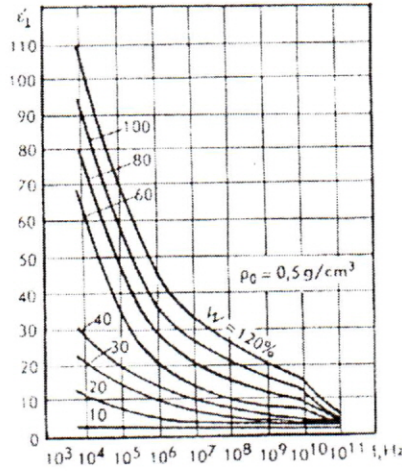


Şekil 1: Hücre çeperi maddesi ve tam kuru odunun liflere dik yöndeki dielektrik sabitinin ϵ'_{\perp} frekansla değişimi ($t = 20^\circ\text{C}$).

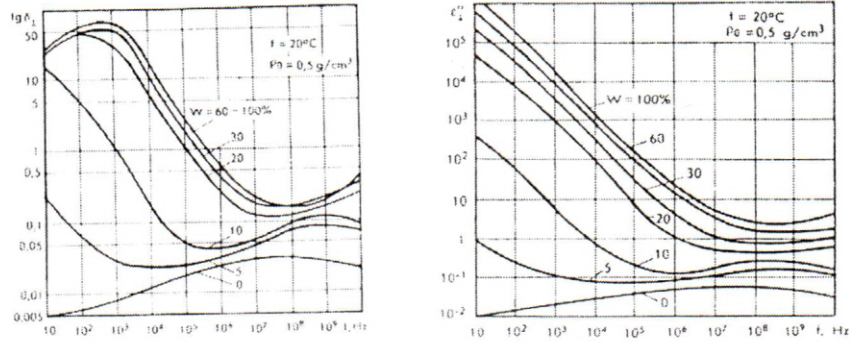


Şekil 2: Hücre çepri maddesi ve tam kuru odunun liflere dik yöndeki kayıp faktörünün ϵ''_{\perp} ve kayıp tanjantının $\tan \delta_{\perp}$ frekansla değişimi ($t = 20^{\circ}\text{C}$).

Rutubetli odunun dielektrik sabiti ve kayıp faktörü de frekansın artışıyla birlikte azalır. Düşük frekanslarda dielektrik sabitinin ve kayıp faktörünün daha yüksek değerde olması, rutubetli odunun bu frekanslarda yüksek bir iyonik iletkenliğe sahip olmasından kaynaklanır. Rutubetli odunun kayıp tanjantının frekans bağımlılığı ise oldukça karmaşıktır. Frekansın artışıyla iyonik iletkenliğin etkisi azalır ve relaksasyon kayıpları belirgin rol oynamaya başlar. 10^{10} - 10^{11} Hz frekans sınırlarında dielektrik sabiti değerindeki ani azalma serbest suyun dielektrik sabiti değerinin bu frekanslarda aniden düşüşü (60 dan 7.7'ye kadar) ile açıklanır. Şekil 3-4'de rutubetli odunun dielektrik parametrelerinin frekansla değişiminin genel karakteri verilmektedir (TORGOVNIKOV 1993).



Şekil 3: Rutubetli odunun liflere dik yöndeki dielektrik sabitinin ϵ'_{\perp} frekansla değişimi ($t = 20^{\circ}\text{C}$), W: rutubet miktarı.



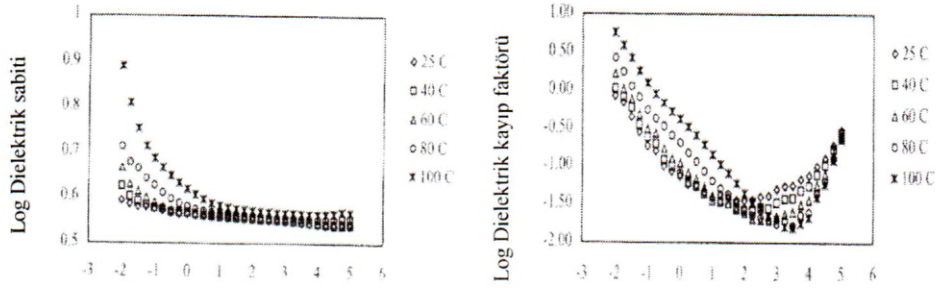
Şekil 4 : Rutubetli odunun liflere dik yöndeki dielektrik kayıp faktörünün ϵ''_{\perp} ve kayıp tanjantının $\tan \delta$ frekansla değişimi ($t = 20^{\circ}\text{C}$); W = rutubet miktarı.

2.2 Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Sıcaklığın Etkisi

Odunun dielektrik özellikleri üzerine sıcaklığın etkisi düşük frekanslarda (JAMES 1975; YOKOYAMA ve ark. 2000; JAMES 1977; KABIR ve ark. 2001; NORIMOTO/YAMADA 1970; NORIMOTO/ YAMADA 1969) ve mikrodalga frekanslarda (KABIR ve ark. 2001; TINGA 1969) yapılan birçok çalışmaya konu olmuştur.

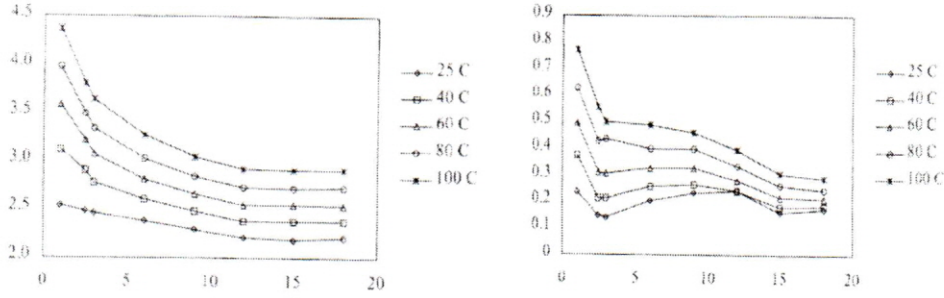
Düşük frekanslarda (10^2 - 10^5 Hz) tam kuru odunun dielektrik sabitinin oda sıcaklığından 100°C 'ye kadar sıcaklığın artışıyla bütün lif yönleri için artış gösterdiği belirtilmektedir. Kayıp faktörü de düşük frekanslarda aynı karaktere sahiptir, yani sıcaklığın artışıyla hızlı bir şekilde artar (Şekil 5) (KABIR ve ark. 2001). Tam kuru odunun kayıp tanjantının sıcaklık bağımlılığı ise karmaşık bir yapıya sahiptir.

Düşük frekanslarda rutubetli odunun dielektrik sabitinin sıcaklıkla birlikte arttığı ve kutuplaşmanın aktivasyon enerjisinin rutubet miktarının artışıyla orantılı olarak artış gösterdiği belirtilmektedir (JAMES 1977).



Şekil 5: Düşük frekanslarda liflere paralel yönde tam kuru odunun dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün sıcaklıkla değişimi.

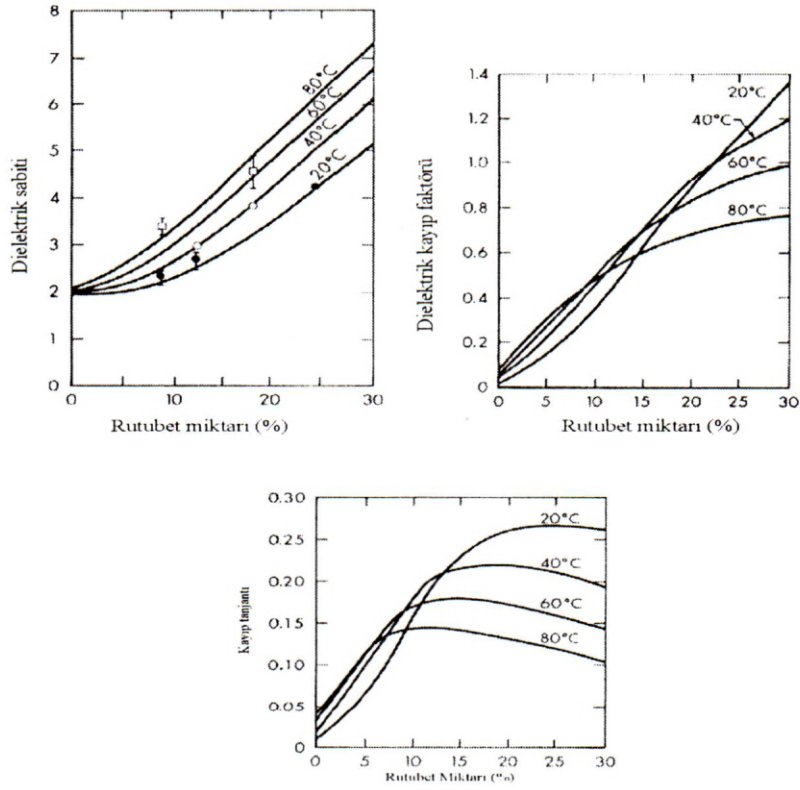
Mikrodalga frekanslarda (1-18 GHz), tam kuru odunun dielektrik sabiti ile sıcaklık arasında bütün lif yönlerinde lineer artan bir ilişki olduğu belirtilmektedir. Dielektrik kayıp faktörü de ayrıca sıcaklıkla lineer bir şekilde artar (Şekil 6) (KABIR ve ark. 2001).



Şekil 6: Mikrodalga frekanslarda liflere paralel yönde tam kuru odunun dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün sıcaklıkla değişimi.

Mikrodalga frekanslarda rutubetli odunun dielektrik sabitinin sıcaklığın artışıyla birlikte artış gösterdiği ve bunun rutubet miktarı arttıkça daha belirginleştiği belirtilmektedir. Rutubetli odunun kayıp faktörü ve kayıp tanjantının sıcaklık bağımlılığı ise daha komplike bir durum gösterir. Kayıp faktörü ve kayıp tanjantı sıcaklığın artışıyla düşük rutubet miktarlarında artış göstermekte ancak daha sonra birden azalmaktadır (Şekil 7) (TINGA 1969).

Sıcaklık odunun dielektrik özelliklerini oldukça büyük oranda etkiler. Çünkü, sıcaklıktaki artışla birlikte relaksasyon süresi azalır. Yüksek sıcaklık ayrıca viskoziteyi (yani moleküler bağ kuvvetlerinin etkisini) azaltır. Sıcaklıkla birlikte dielektrik sabitindeki artış, oduna bağlı bulunan dipol gruplarının yani amorf bölgedeki metilol gruplarının varlığı ile açıklanır (YOKOYOMA/NORIMOTO 1996). Odunun kutuplanabilirliği sıcaklığın artışıyla sürekli bir şekilde artar (JAMES 1975). Sıcaklık yükseldikçe maddenin iyonları arasındaki bağlar zayıflar ve iyonlar kolay yer değiştirir. Böylece sıcaklığın etkisiyle dipoller enerji kazanırlar ve böylece yeniden yönelmelerine katkıda bulunulur ve sonuçta dielektrik sabiti artar. Ayrıca frekansla birlikte güçlü bir ilişki içindedirler (JAMES 1977). Düşük frekanslarda hem selüloz moleküllerinin sabit dipol momenti hem de arayüzey kutuplaşması termal enerjiyle aktive edilir (KABIR ve ark. 2001). Norimoto ve Yamada (1970), enerji absorpsiyonunu 3 nedene bağlamaktadır: birincisi; selüloz, hemiselüloz ve lignin moleküllerinin farklı hareketi; ikincisi, selülözün kristal ve amorf bölgeleri arasındaki arayüzey kutuplaşması; ve son olarak lameler yapıları gibi odunun mikroskopik heterojen yapıları arasındaki arayüzey kutuplaşmasıdır. Arayüzey ve dipol kutuplaşma termal olarak aktive edilen mekanizmaları kapsar. Kutuplaşmanın termal olarak aktive olan mekanizmalarının bulunması dielektrik özelliklerin sıcaklıktan etkilenmesi sonucunu doğurur.



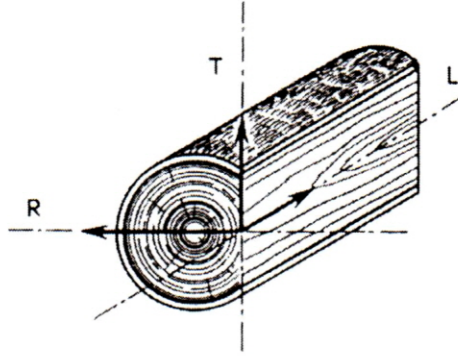
Şekil 7: 2.45 GHz frekansında liflere paralel yönde Douglas odununun dielektrik sabiti, kayıp faktörü kayıp tanjantının rutubet miktarının fonksiyonu olarak sıcaklıkla değişimi.

2.3 Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Elektrik Alan Şiddetinin Etkisi

Odunun dielektrik özellikleri üzerine alan şiddetinin etkisi henüz ayrıntılı olarak araştırılmamıştır. Bunun nedeni elektrik alan şiddetinin etkisinin çok küçük olmasından kaynaklanır (TORGOVNIKOV 1993).

2.4 Odunun Heterojen Yapısının Dielektrik Özellikler Üzerine Etkisi

Odun yıllık halkalarla bağlantılı olarak teğet (T), radyal (R) ve liflere paralel (L) yön olmak üzere 3 yapısal simetri düzlemine sahiptir (Şekil 8). Odunun bu üç lif yönündeki dielektrik özelliklerinde farklılıklar bulunduğu bilinmektedir. Aynı odun yoğunluğu ve alan frekansı için tam kuru ve rutubetli odunun liflere paralel yöndeki dielektrik özellikleri liflere dik yöndenkinden genellikle daha büyüktür. Teğet ve radyal yön arasındaki fark ise daha az belirgin olup odun türüne, rutubet miktarına göre değişmektedir. Ayrıca frekans arttıkça aradaki fark azalmaktadır (KABIR ve ark. 1998; TORGOVNIKOV 1993; ŞAHİN 1993).



Şekil 8: Odunun 3 ana lif yönü. L, liflere paralel yön; R, radyal yön; T, teğet yön.

Bu üç lif yönündeki farklılık odunun makroskopik, mikroskopik ve moleküler yapısıyla açıklanmaya çalışılmıştır. NORIMOTO/YAMADA (1971, 1972), bu problemi odunun makroskopik ve moleküler yapısını birlikte ele alarak odun maddesi dipollerinin dielektrik relaksasyon mekanizmalarıyla bağlantılı olarak çözmeye çalışmışlardır. Bu çalışmalara göre, liflere paralel, teğet ve radyal yöndeki dielektrik özellikler arasındaki farklılık hücre çeperi maddelerinin heterojenliğine ilaveten hücre çeperi lümeni ve düzenindeki farklılığa atfedilir (NORIMOTO ve ark. 1978). Liflere paralel yönde dielektrik özelliklerin daha yüksek olması NORIMOTO ve YAMADA (1971) tarafından dipolun bitişik kesime geçiş olasılığının, elektrik alanı liflere paralel yönde olması durumunda dik yönlere kıyasla daha büyük olması ve ayrıca liflere paralel yönde bitişik kesimler arasındaki potansiyel bariyerlerin yüksekliğinin dik yönlere kıyasla daha büyük olması ile açıklanır. Ayrıca, KABİR ve ark. (1998) de selülozun hidroksil gruplarının liflere paralel yönde daha yüksek devir serbestliğine sahip olduğunu belirtmektedir. NORIMOTO ve YAMADA (1972) ayrıca dielektrik heterojenliğe kimyasal bileşiklerinin dielektrik özelliklerinin neden olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, odunun liflere paralel yöndeki dielektrik özelliklerinin büyük ölçüde selüloz ve mannanın dielektrik özelliklerinden ve enine yöndeki dielektrik özelliklerinin ise önemli ölçüde ligninin dielektrik özelliklerinden etkilendiği belirtilmektedir. Yalnızca optikal ve infrared kutuplaşmaların dielektrik özelliklere neden olduğu çok yüksek frekans bölgelerinde odunun dielektrik heterojenliği yalnızca makroskopik yapıdan kaynaklanır ve liflere paralel yöndeki dielektrik sabiti liflere dik yöndekine eşittir. Diğer yandan dipol hareketinden kaynaklanan relaksasyon kutuplaşmasının dielektrik özellikler üzerinde etkili olduğu frekans sınırlarında dielektrik özellikler moleküler yapıya bağlıdır ve liflere paralel yöndeki dielektrik sabiti liflere dik yöndekinden daha büyüktür.

NORIMOTO ve ark. (1978), bu üç yöndeki farklılığın ayrıca yaz odunu yüzdesi, hücre çeperi alanının hücre alanına oranı ve hücre düzenine bağlı olabileceğini belirtmektedirler. Traheler, traheidler ve lifler tomruk eksenine boyunca yönelmişlerdir. NORIMOTO (1976)'ya göre, yumuşak odunu hücrelerinin radyal çeperlerinde mikrofibrillerin hücre eksenine yaptıkları mikrofibril açısı ilkbahar odununda 23.5° - 35.6° ve yaz odununda 4.2° - 14.2° 'dir. Hücrelerin teğet çeperlerinde ise 12.5° - 28.5° ve yaz odununda 8.5° - 19.7° 'dir. Lif açısı azaldıkça dielektrik özellikler yükselir (NORIMOTO/YAMADA 1972).

Teğet yönle kıyaslandığında radyal yönde dielektrik parametrelerin daha büyük olması radyal yönde uzanmış özışınları ile açıklanmıştır ve özışınlarının etkisinin hacimleriyle orantılı olduğu belirtilmiştir (TORGOVNIKOV 1993). Ayrıca odun örneğinde yaz odunu oranı arttıkça

dielektrik özellikler yükselir ki bu odun yoğunluğundaki artışa bağlıdır (NORIMOTO *ve ark.* 1978). Odunun yoğunluğunun artışıyla birlikte polar grupların sayısı artacağından doğrudan dielektrik özelliklerde artış gözlenir.

2.5 Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Rutubet Miktarının Etkisi

Odunun dielektrik özellikleri üzerine rutubet miktarının etkisi 4 rutubet bölgesi dikkate alınarak analiz edilir: % 0-5 (monomoleküler) rutubet miktarında, %5 den % 15-18'e kadar (adsorpsiyon) rutubet miktarında, % 18' den LDN'a kadar (kapiler-kondense rutubet) ve LDN' nin üzerinde (serbest rutubet). Odun ile bu 4 tür rutubet bölgesi arasındaki etkileşim farklıdır. Odun ve rutubet arasındaki her farklı tip bağ rutubetli odunun elektrik özellikleri üzerine kendine has etkiye sahiptir. Kural olarak, yukarıda bahsedilen rutubet bölgesi sınırlarında odunun dielektrik özelliklerinde önemli değişimler meydana gelir.

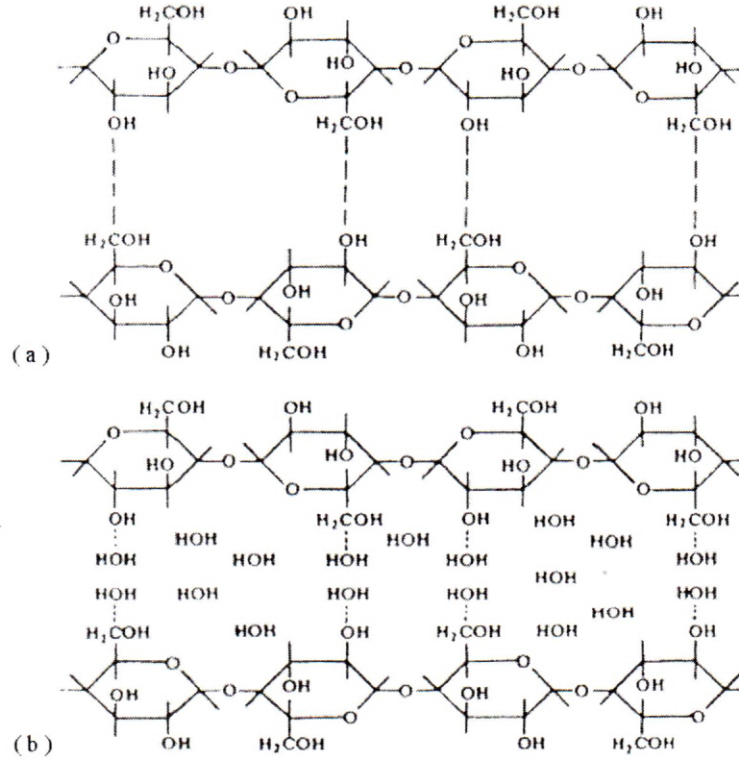
Odununda adsorpsiyon ve kapiler kondenzasyon şeklinde bulunan su (bağlı su), odun ile etkileşimi sonucu kendi dielektrik özelliklerini değiştirir ve böylece odunun dielektrik özelliklerinde değişimlere sebep olur. Hücre boşluklarını (lümenlerini) dolduran serbest su da ayrıca odun ve elektromanyetik alan arasındaki etkileşimlerin karakterini değiştirir. Bu değişimler özellikle suyun anormal yüksek dielektrik parametrelerine sahip olduğu frekans bölgelerinde rutubetli odunun dielektrik özelliklerinde önemli farklılığa neden olur. Serbest su, odunun dielektrik özelliklerinden çok daha yüksek dielektrik özellik değerine sahip olduğundan odununda dielektrik özellikler üzerinde en etkili olan ve birçok durumda dielektrik özellikleri belirleyen maddedir.

Odunun dielektrik özellikleri üzerine rutubet miktarının etkisi düşük ve mikrodalga frekanslarında gerçekleştirilen birçok araştırmaya konu olmuştur (JAMES 1977; PEYSKENS *ve ark.* 1984; JAIN/DUBEY 1988; JAMES 1975; KHALID *ve ark.* 1999; OLMİ *ve ark.* 2000; KABİR *ve ark.* 1997; KABİR *ve ark.* 1998; JAMES/HAMİLL 1965). Bu çalışmalarda, odunun dielektrik özellikleri üzerine rutubet miktarının etkisinin bütün frekans sınırlarında oldukça belirgin olduğu belirtilmektedir. Düşük frekanslarda rutubet miktarı ile dielektrik parametreler arasında üssel bir ilişkinin bulunduğu (TORGOVNIKOV 1993; KABİR *ve ark.* 1998), mikrodalga frekanslarda ise 2., 3. veya 4. dereceden çok değişkenli eşitliklerin uygun olduğu (PEYSKENS *ve ark.* 1984; KABİR *ve ark.* 1997; KABİR *ve ark.* 1998; ŞAHİN 2002; JAIN/DUBEY 1988) belirtilmektedir.

Odunun dielektrik özellikleri üzerine rutubet miktarının etkisinin mekanizmasını açıklanmak için olayın temelini oluşturan 2 faktörün kombinasyonu birlikte ele alınır. Bir yandan odunun rutubet miktarının artışıyla odun içindeki su miktarı artar ve su odun maddesinden yüksek dielektrik özelliğine sahip olduğundan dolayısıyla dielektrik özellikler artar. Diğer yandan, su miktarının artışıyla hücre çeperinin ve selülozun polar bileşikleri daha yüksek rutubet miktarında daha yüksek hareket serbestliği elde ederler ve böylece bariz şekilde dielektrik özelliklere katkıda bulunurlar. Rutubetlenmenin başlangıç aşamalarında bu iki faktörün kombinasyonu dielektrik özelliklerde hızlı bir artışa neden olurken, LDN'a yaklaşırken polar grupların önemi artık kalmaz çünkü onların devir serbestliği maksimuma ulaşır. LDN'dan sonra esas rolü serbest suyun dielektrik davranışı ve odun içindeki hacmi belirler (PEYSKENS *ve ark.* 1984; JAMES/HAMİLL 1965; KHALID *ve ark.* 1999).

Elektromanyetik alanın etkisi altında meydana gelen selülozun salınım (titreşim) mekanizması 3 hidroksil grubunun devinim olasılığına bağlı olup, glukoz kalıntıları arasındaki glukozidik oksijen hareketsiz kalır. Tam kuru halde odundaki selüloz makromolekülleri ikincil kuvvetlerle birbirine bağlıdır (Şekil 9a). Bu kuvvetler elektromanyetik alanın etkisi altında molekül dipollerinin yerdeğişimini önler. Rutubetlendirme işlemi, selülozun molekülleri arasına

su moleküllerinin penetrasyonuna neden olur ve böylece enine bağların zayıflamasına yol açar (Şekil 9b). Bu durum dipollerin hareket yeteneğinin artmasına neden olur (TORGOVNIKOV 1993).



Şekil 9: Selülozün moleküler bağları üzerine rutubetin etkisi; (a) İkincil kuvvetlerle bağlı selüloz makromolekülleri, (b) Su molekülleri tarafından zincirler arası bağların kırılması.

Odun rutubetinin %1 artışıyla birlikte, selüloz molekülündeki her bir 10. glukoz halkası ve her bir 30. OH grubu 1 molekül suyu kabul eder. % 3'e eşit bir rutubet miktarında her bir 10. OH grubu doyurulacaktır. % 5 rutubet miktarına kadar (20 °C'de) odunda mevcut monomoleküler suyun odunun dielektrik özellikleri üzerine etkisi önemsizdir. Bu iki şekilde açıklanabilir: Bu aşamada odun ile su arasındaki hidrojen bağlarının yüksek dirence sahip olması ve odundaki rutubet miktarının nispeten küçük olması. Bununla beraber, sıcaklığın artışıyla birlikte 20-10³ Hz frekans sınırlarında % 5 rutubete kadar odunun dielektrik özelliklerinde artış gözlenir. Bu suyun iletkenliğindeki artışa atfedilir.

Rutubet miktarı %5'den %15-23'e kadar arttığında, yani adsorpsiyon bölgesinde, dielektrik sabiti değeri büyük ölçüde artar ve kayıp tanjantı değerinde ani bir artış meydana gelir. Bu artış özellikle düşük frekanslarda olmak üzere bütün frekanslarda meydana gelir. Düşük frekanslarda bu artışa iyon iletkenliği katkıda bulunurken, yüksek frekanslarda bu artışa dipol sayısındaki artış ve dipol ve iyon relaksasyon kutuplaşması katkıda bulunur.

Kapiler-kondense rutubette kayıp tanjantını artırır. Ancak bunun etkisi adsorpsiyon rutubetinin etkisinden daha az belirgin ancak serbest rutubetin etkisinden daha büyüktür.

Serbest rutubet de ayrıca, odunun dielektrik özelliklerini artırır ve bu artış odundaki mevcut miktarıyla orantılıdır. LDN rutubet miktarının üzerinde serbest su molekülleri hücre çeperi maddesi ve bağlı sudan bağımsız olarak mikrodalga alanıyla etkileşim halindedir. TORGOVNIKOV (1993) taze kesilmiş ağaçtan elde edilen rutubetin özelliklerinin saf suyunkinden farksız olduğunu belirtmiştir. Bu yüzden LDN üzerinde odunun dielektrik sabiti ve kayıp faktöründeki değişim karakterini esas olarak serbest suyun dielektrik özellikleri ve nisbi hacmi belirler. Rutubet miktarının artışıyla odun içindeki su miktarı artar ve bu da yüksek dielektrik davranışa yol açar (KABIR *ve ark.* 1997; KABIR *ve ark.* 1998). Kayıp tanjantı, 10^8 Hz'e kadar frekans sınırlarında ve % 30'dan % 60 rutubet miktarına kadar artar. Bundan sonra odun rutubetinin % 100 kadar artışı pratik olarak kayıp tanjantını etkilemez. Daha yüksek frekanslarda (3×10^8 Hz'den 10^{10} Hz'e kadar frekanslarda) %30'dan %100 kadar rutubet miktarındaki artış LDN daki odunun ve suyun kayıp tanjantı değerine bağlı olarak kayıp tanjantı değerini artırır veya azaltır.

Sıcaklıktaki artışla birlikte 5×10^9 Hz' e kadar frekanslarda serbest suyun dielektrik sabiti 20°C 'de 78°C 'den, 95°C 'de 50°C 'ye kadar azalır, ki bu rutubetli odunun dielektrik sabitini azaltır. 10^{10} Hz ve daha yüksek frekanslarda suyun dielektrik sabiti değeri sıcaklığın artışıyla artar ki bu rutubetli odunun dielektrik sabitinde artışa neden olur. 20°C de serbest suyun maksimum kayıp tanjantı değerine 6×10^{10} Hz frekansında rastlanır ve 1.77'ye eşittir. Su yüksek kayıp tanjantı değerine sahip olduğu için, % 30 rutubet miktarının üzerinde odunun kayıp tanjantı üzerindeki payı büyüktür ve odunun maksimum kayıp tanjantı 6×10^{10} Hz civarındaki frekansta olması beklenir. Bununla beraber, % 30'un üzerinde kayıp faktörünün maksimum değeri 20°C ' de 1.5×10^{10} Hz ve 40°C de 2.4×10^{10} Hz frekansta bulunur.

10^{10} Hz frekans sınırlarına kadar, rutubetli odunun dielektrik özelliklerindeki değişim iyonik iletkenlik, odun dipolleri relaksasyon (dipol-kökenli) kutuplaşması, iyon relaksasyon kutuplaşması ve kendiliğinden kutuplaşmadır. Farklı frekanslarda rutubet miktarına bağlı olarak, dielektrik özellikler üzerine farklı tür kutuplaşmanın ve iletkenliğin etkisi değişir. Düşük frekanslarda, doğru akım iletkenliğine ilaveten kendiliğinden ve iyon relaksasyon kutuplaşması baskındır. Buna rağmen, yüksek frekanslarda dipol relaksasyon kutuplaşması hakimdir.

10^{10} 'un üzerinde rutubet miktarına sahip odun düşük frekanslarda (10^4 Hz'e kadar) aşırı derecede büyük dielektrik sabiti ve kayıp tanjantına sahiptir. Bu, elektrik alanının etkisi altında odunun kutuplaşma yeteneği ve rutubetli odunun yüksek elektrik iletkenliğinden kaynaklanır. Düşük frekanslarda odunda kendiliğinden kutuplaşma ve iyon relaksasyon kutuplaşması meydana gelir. Bu tip kutuplaşmalar, büyük relaksasyon süresi sabiti değerleri ile karakterize edilirler. LDN aşan rutubet miktarlarına sahip odunun dielektrik özellikleri üzerine bu tip kutuplaşmaların etkisi suyun iletkenlik değeriyle karşılaştırıldığında önemsiz gibi görünür. Bu nedenle, düşük rutubet miktarlarında elektriksel iletimde esas rol kutuplaşma mekanizmasına, yüksek rutubet miktarlarında ise iyonik iletimine atfedilir. Düşük ve yüksek rutubet miktarları arasında elektriksel iletim arasındaki bu farklılık rutubet adsorpsiyon mekanizması ile ilgilidir (KURODA/TSUTSUMI 1981; KURODA/TSUTSUMI 1979; KURODA *ve ark.* 1998).

Odunun elektrik iletkenliği, iyonların konsantrasyonu ve hareket yeteneğine bağlıdır. Rutubet miktarındaki artış, hem ayrılan (çözünen) iyonların miktarını hem de bunların yerdeğişim imkanını artırır, bu da odunun iletkenliğinde artış sonucunu doğurur. JAMES (1975), rutubetli odunun iletkenliği ile selülozun amorf bölgeleri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Bu araştırmaya göre, kristal bölgeler su moleküllerini penetre edemez ve suyun bulunması durumunda bu bölgeler iletken değildir. Buna rağmen amorf bölgeler rutubeti absorbe eder ve iletken bölge

olarak rol oynarlar. Dış elektrik alanın etkisi altında, iyonlar amorf bölgelere doğru göç eder ve kristallerin yüzeylerinde toplanırlar.

10^4 Hz'in üzerindeki frekanslarda rutubetli odunun dielektrik özellikleri üzerine iletkenliğin etkisi tedrici olarak azalır, ancak odunun dielektrik parametreleri iyon relaksasyon kutuplaşması ve dipol relaksasyon kutuplaşmasının rolüyle artar. 10^8 Hz'in üzerindeki frekanslarda relaksasyon kayıpları doğru akım iletkenliğinden kaynaklanan kayıpları aşar. Bununla beraber, odunun dielektrik özellikleri üzerine farklı tür kutuplaşmanın etkisini ve doğru akım iletkenliğinin etkisini sayısal olarak tahmin etmek mümkün değildir.

Negatif sıcaklıklarda odunun dielektrik özellikleri güçlü bir şekilde rutubet miktarına bağlıdır. -50 °C'de ve LDN üzerindeki rutubet miktarında odunda hala %12 oranında donmamış su bulunur (bu su bağlı suyun bir kısmıdır). Odunda geri kalan suyun tümü buz şeklindedir. Sıcaklığın artışıyla birlikte çözünme miktarına bağlı olarak, bağlı suyun miktarı artar. Yaklaşık -1 °C sıcaklıkta bağlı su tamamen erir. 0 °C ye kadar sıcaklığın artışıyla birlikte serbest su tamamen çözünür. Sıcaklıktaki değişimle birlikte buz ve donmamış su oranı sabit bir şekilde değişir. Serbest su orijinali buz bölünmüş kristal bir yapıya sahiptir. Bu kristallerin yüzeyinde bir miktar su, daima ince bir film halinde mevcuttur. Bu su filmlerinin dielektrik özellikleri buzun dielektrik özelliklerinden farklıdır. Hücre çeperi maddesi, donmamış ve bağlı su ve monomoleküler su filmlerinin hepsinin dielektrik özellikleri farklıdır. Negatif sıcaklık bölgelerinde sıcaklıktaki artışla birlikte, %30 rutubet miktarına kadar dielektrik sabitinde sürekli bir artış meydana gelir. Dielektrik sabiti 0 °C sıcaklığa gelindiğinde ani bir değişime uğramaz. Buna rağmen % 30 rutubet miktarının üzerinde serbest su dolayısıyla 0 °C' de dielektrik sabitinde ani bir artışa neden olur. Donmuş, rutubetli odunun dielektrik özellikleri üzerinde doğru akım iletkenliğinin etkisi pozitif sıcaklıklardaki etkisinden bir derece daha düşüktür ve böylece kutuplaşma mekanizmaları 10^4 Hz'in üzerinde esas rolü oynarlar. Donmuş odun bileşenlerinin kayıp faktörlerinin maksimum değerlerine farklı frekans sınırlarında rastlanır.

Dipol moleküllerden oluşan maddelerdeki dielektrik relaksasyon mekanizması, moleküllerin (grupların) önce belirli geçici denge pozisyonlarına ve sonra hızlı ve ani devinim hareketlerinin kombinasyonu ile elektrik alan yönüne göre yeni bir denge pozisyonuna geçişidir. Böyle bir denge pozisyonuna geçiş işlemi, çevresindekilere nispetle moleküllerin pozisyonlarındaki değişim nedeniyle oluşur. Moleküllerin (grupların) bu yer değişimi işleminde bu denge pozisyonlarını ayıran enerji bariyerlerinin aşılması için aktivasyon enerjisi harcanır (NORIMOTO/YAMADA 1971). Tam kuru ve rutubetli odunun dielektrik relaksasyon mekanizmasını karakterize eden esas enerji faktörü, aktivasyon enerjisidir. JINZHEN (2001), rutubet miktarı dengesiz durumda iken odunun dielektrik özelliklerini moleküler seviyede incelemiş ve aynı rutubet miktarında dengesiz durumdan absorbe suyun aktivasyon enerjisinin denge durumundakinden daha düşük olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle aynı şartlar altında dengeli bir rutubete sahip odunun dielektrik özellikleri dengesiz durumdakinden daha yüksek olacaktır.

2.6 Dielektrik Özellikler Üzerine Odun Yoğunluğunun ve Ağaç Türünün Etkisi

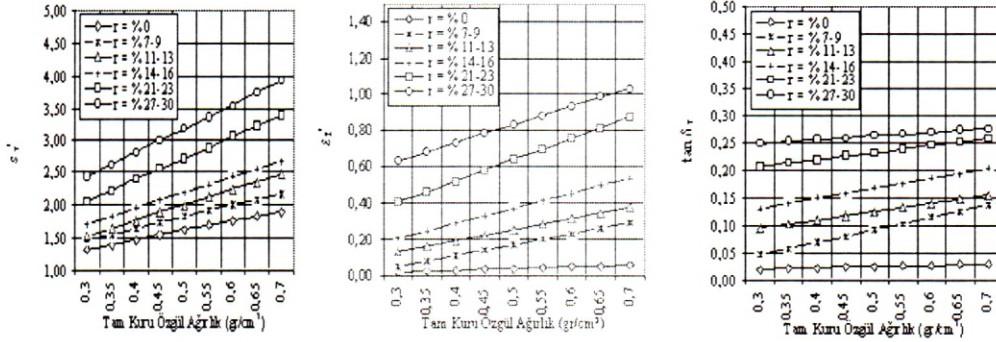
Odun türlerinin dielektrik davranışları arasındaki farklılıklar onların spesifik karakteristiklerinin biri veya daha fazlası ile ilişkilidir. Bunlar arasında, odunun yoğunluğu ve permeabilitesini belirleyen odunun sorpsiyon kapasitesi ve her bir türün genel yapısı en belirleyici olanlardır. Ayrıca odun türlerinin dielektrik davranışları arasındaki farklılığın odunun kimyasal içeriğinden kaynaklanabileceği belirtilmektedir. LIN (1967) dielektrik özelliklerle odunun kül ve ekstraktif madde miktarı arasında ilişkinin olduğunu belirtmektedir.

Bir dielektriğe alternatif voltaj uygulandığında moleküller uygulanan alan yönünde düzene girme eğilimine sahip olacaktırlar ve bu sırada materyal içinde iç bağlanma kuvvetlerine karşı çalışma meydana gelecektir. Tam kuru özgül ağırlığın artması durumunda odundaki polar grupların sayısında artış olur ve sonuçta dielektrik özellikler artar (VERMAAS 1974).

Örnekteki yaz oranı arttığında dielektrik sabiti değeri artar ki bu ortalama özgül ağırlığın artışıdan kaynaklanır (TORGOVNIKOV 1993). Böylece odunun sorpsiyon kapasitesinin, odunun dielektrik özellikleri üzerindeki direkt etkisi ortaya çıkar (PEYSKENS ve ark. 1984).

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda farklı ağaç türü odunlarının dielektrik özelliklerinin farklı olduğu ancak bu durumun ağaç türünden ziyade odun yoğunluğundaki farklılıktan kaynaklandığı belirtilmektedir. Diğer şartlar aynı olduğunda odunun dielektrik özelliklerini belirleyen esas faktör tam kuru özgül ağırlıktır.

Dielektrik özelliklerle tam kuru özgül ağırlık arasında lineer bir ilişki olduğu çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir. Ayrıca dielektrik sabiti ile tam kuru özgül ağırlık arasındaki ilişkinin rutubet miktarının artışıyla belirginleştiği belirtilmektedir (JAIN/DUBEY 1988; PEYSKENS ve ark. 1984; VERMAAS 1974; ŞAHİN 2002). 0.3-0.7 gr/cm³ tam kuru özgül ağırlık sınırlarında, 9.8 GHz frekansında rutubet miktarının fonksiyonu olarak tam kuru özgül ağırlık ile dielektrik özellikler arasındaki ilişki Şekil 10' da verilmektedir (ŞAHİN 2002).



Şekil 10: 9.8 GHz frekanslarında dielektrik sabiti (ϵ'), kayıp faktörü (ϵ'') ve kayıp tanjantının ($\tan \delta$) miktarının fonksiyonu olarak kayıp tanjantının özgül ağırlıkla değişimi.

TORGOVNIKOV (1993), özgül ağırlığın artışıyla dielektrik sabitinin arttığını, ancak kayıp tanjantının özgül ağırlıkla bağımlılığının karmaşık bir yapı sergilediğini belirtmiştir. VERMAAS (1974), düşük frekanslarda yaptığı çalışmalarda, düşük rutubet miktarlarında özgül

ağırlığın artışıyla kayıp tanjantı artarken yüksek rutubet miktarlarında özgül ağırlık 0.4 den 0.7 gr/cm³ e çıkarken kayıp tanjantının azaldığını ifade etmektedir. Ayrıca, PEYSKENS ve ark. (1984) kayıp tanjantında özgül ağırlıkla ilişkili olarak düşük rutubet miktarlarında görülen pozitif ilişkinin daha yüksek rutubet miktarlarında negatif ilişkiye döndüğünü belirtmektedir.

KAYNAKLAR

- JAIN, V.K.; DUBEY, Y.M., 1988: Dielectric Constant of Some Indian Timbers in Axial Direction at Microwave Frequencies, J.Ind. Acad. Wood Sci., 19, 2, 25-36.
- JAMES, W.L., 1975: Dielectric Properties of Wood and Hardboard: Variation with Temperature, Frequency, Moisture Content, and Grain Orientation, USDA Forest Service Research Paper, FPL 245, 1-32.
- JAMES, W.L., 1977: Dielectric Behavior of Douglas-Fir at Various Combinations of Temperature, Frequency, and Moisture Content, Forest Products Journal, 27, 6, 44-48.
- JAMES, W.L.; HAMILL, D.W., 1965: Dielectric Properties of Douglas-Fir Measured at Microwave Frequencies, Forest Products Journal, 15, 2, 51-56.
- JINZHEN, C.; GUANGJIE, Z., 2001: Dielectric Relaxation Based on Adsorbed Water in Wood Cell Wall under Non-Equilibrium State 2., Holzforschung, 55, 87-92.
- KABIR, M.F.; KHALID, K.B.; DAUD, W.M.; AZIZ, S.H.A., 1997: Dielectric Properties of Rubber Wood at Microwave Frequencies Measured with an Open-Ended Coaxial Line, Wood and Fiber Science, 29, 4, 319-324.
- KABIR, M.F.; DAUD, W.M.; KHALID, K.; SIDEK, H.A.A., 1998: Dielectric and Ultrasonic Properties of Rubber Wood. Effect of Moisture Content, Grain Direction and Frequency, Holz als Roh-und Werkstoff, 56, 223-227.
- KABIR, M.F.; DAUD, W.M.; KHALID, K.B.; SIDEK, H.A.A., 2001: Temperature Dependence of the Dielectric Properties of Rubber Wood, Wood and Fiber Science, 32, 2, 233-238.
- KHALID, K.; SAHRI, M.H.; KEONG, N.K.; FUAD, S. A., 1999: Microwave Dielectric Properties of Wooden Cross-arms, Part of the SPIE Conference on Subsurface Sensors and Applications Denver, Colorado, SPIE Vol. 3752, 147-156.
- KURODA, N.; TSUTSUMI, J., 1979: Effects of Applied Voltage on Electrical Conductivity of Wood, Mokuzai Gakkaishi, Journal of the Japan Wood Research Society, 25, 12, 757-762.
- KURODA, N.; TSUTSUMI, J., 1981: Effect of Moisture Content and Temperature on Frequency Dependence of Conductivity of Wood, Mokuzai Gakkaishi, Journal of the Japan Wood Research Society, 27, 9, 665-670.
- KURODA, N.; TSUTSUMI, J.; WATANABE, H., 1998: Effects of Specific Gravity and Morphological Factors on Electrical Conduction in Hardwoods, Bulletin of the Kyushi University Forests, 58, 137-149.
- LIN, R.T., 1967: Review of the Dielectric Properties of Wood and Cellulose, Forest Prod. J., 17, 7, 61-66.
- NORIMOTO, M., 1976: Dielectric Properties of Wood, Wood Research, 59/60 106-151.

NORIMOTO, M.; YAMADA, T., 1969: The Dielectric Properties of Wood II-Temperature Dependence of Dielectric Properties of Wood in Absolutely Dried Condition, Mokuzaï Kenkyu, Journal of the Japan Wood Research, 46, 1-9.

NORIMOTO, M.; YAMADA, T., 1970: The Dielectric Properties of Wood IV, On Dielectric Dispersions of Oven-dried Wood, Wood Research, 50, 36-49.

NORIMOTO, M.; YAMADA, T., 1971: The Dielectric Properties of Wood V, On the Dielectric Anisotropy of Wood, Wood Research, 51, 12-32.

NORIMOTO, M.; YAMADA, T., 1972: The Dielectric Properties of Wood VI, On the Dielectric Properties of the Chemical Constituents of Wood and the Dielectric Anisotropy of Wood, Wood Research, 52, 30-43.

NORIMOTO, M.; HAYASHI, S.; YAMADA, T., 1978: Anisotropy of Dielectric Constant in Coniferous Wood, Holzforschung, 32, 5, 167-172.

OLEYEDE, A.; GROOMBRIDGE, P., 2000: The Influence of Microwave Heating on the Mechanical Properties of Wood, Journal of Materials Processing Technology, 100, 67-73.

OLMI, R.; BINI, M.; IGNESTI, A.; RIMINESI, C., 2000: Dielectric Properties of Wood from 2 to 3 GHz, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 35, 3, 135-143.

ÖRS, Y., 1986: Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi, I.Kısım, Odunun Fiziksel Özellikleri, Ders Notları, K.Ü. Ders Teksirleri Serisi No.11, K.Ü. Orman Fakültesi, Trabzon.

PEYSKENS, E.; POURCQ, M.; STEVENS, M.; SCHALCK, J., 1984: Dielectric Properties of Softwood Species at Microwave Frequencies, Wood Science Technol., 18, 267-280.

ŞAHİN, H., 2002: Mikrodalga Frekanslarda Doğal ve Emprenye Edilmiş Odun Türlerinin Dielektrik Özellikleri, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Trabzon.

TINGA, W.R., 1969: Dielectric Properties of Douglas Fir at 2.45 GHz, Journal of Microwave Power, 4, 3, 160-164.

TINGA, W.R.; NELSON, S.O., 1973: Dielectric Properties of Materials for Microwave Processing-Tabulated, Journal of Microwave Power, 8, 1, 23-65.

TORGOVNIKOV, G.I., 1993: Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer-Verlag, Berlin.

VERMAAS, H.F., 1971: The Dielectric Properties of Wood, University of Stellenbosch, Thesis Presented for the Degree of Doctor of Science in Wood Science, Stellenbosch, South Africa.

VERMAAS, H.F.; POUND, J.; BORGIN, K.B., 1974: The Loss Tangent of Wood and Its Importance in Dielectric Heating, South African Forestry Journal, 89, 5-8.

YOKOYAMA, M.; NORIMOTO, M., 1996: Contour Diagrams of Dielectric Loss for Absolutely Dried Spruce Wood, Wood Research, 83, 37-39.

YOKOYAMA, M.; OHMAE, K.; KANAYAMA, K.; FURUTA, Y.; NORIMOTO, M., 2000: Mechanical and Dielectric Relaxations of Wood in a Low Temperature Range. IV. Dielectric Properties of Adsorbed Water at High Moisture Contents, Mokuzaï Gakkaishi / Journal of the Japan Wood Research Society, 46, 6, 523-530.